

0- 790716

На правах рукописи



Пономарев Иван Викторович

**СТРУКТУРЫ ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ**

специальность 01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре полупроводниковой электроники ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» и в лаборатории физики полупроводников ОСП «Сибирский физико-технический институт имени акад. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета»

|                        |  |
|------------------------|--|
| Научный руководитель:  | кандидат физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник<br>Вилисова Мария Дмитриевна   |
| Научный консультант:   | доктор физико-математических наук,<br>профессор Гермогенов Валерий Петрович  |
| Официальные оппоненты: | доктор физико-математических наук,<br>профессор Давыдов Валерий Николаевич<br><br>доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник<br>Коханенко Андрей Павлович |
| Ведущая организация:   | Федеральное государственное унитарное<br>предприятие "Государственный научный<br>центр Российской Федерации - Институт<br>физики высоких энергий" (г. Протвино)                |

Защита состоится «8» декабря 2011 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д. 212.267.07 в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина 36

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г.Томск, пр.Ленина 34, а

Автореферат разослан «7» ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.267.07,  
доктор физико-математических наук,  
профессор



И. В. Ивонин

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000688183

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Традиционными материалами для полупроводниковых детекторов заряженных частиц и квантов ионизирующих излучений являются Si, Ge, CdTe. В качестве альтернативного материала можно выделить арсенид галлия (GaAs), чему способствуют большие значения коэффициентов поглощения  $\gamma$ -квантов и рентгеновского излучения, высокая подвижность носителей заряда и возможность работы при комнатной температуре. Технологии выращивания монокристаллов и эпитаксиальных слоев являются базовыми для изготовления детекторов на основе GaAs. Эпитаксиальный GaAs обладает более высокой степенью кристаллического совершенства по сравнению с монокристаллическим материалом. Поэтому для создания детекторов с высокими энергетическим разрешением и эффективностью собирания заряда эпитаксиальные слои являются более предпочтительными.

В настоящее время для получения эпитаксиальных слоев GaAs наиболее широко используется газопазовая эпитаксия (ГФЭ). Детекторные структуры на их основе содержат барьер Шоттки либо  $p$ - $n$ -переход, область пространственного заряда (ОПЗ) которых является активной областью детектора. Для эффективной работы детекторов необходимо, чтобы активная область занимала как можно большую толщину эпитаксиального слоя. Одним из путей увеличения толщины активной области является использование нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs с низкой концентрацией электронов ( $n = 1 \cdot 10^{11} \div 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ). Однако современный уровень технологии газопазовой эпитаксии не позволяет устойчиво и воспроизводимо получать слои  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $n \leq 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Поэтому актуальным является поиск альтернативных способов понижения концентрации носителей заряда в эпитаксиальных слоях. Этого можно достичь, например, за счет введения радиационных дефектов. Другим способом может быть компенсация остаточных донорных примесей в слоях  $n$ -GaAs атомами глубокой акцепторной примеси, например, хрома. Этот метод достаточно изучен и широко используется для разработки детекторов на основе объемного арсенида галлия. Однако, для эпитаксиального материала подобные исследования отсутствуют. К моменту начала данной работы в этом направлении были проведены лишь пробные эксперименты без детального анализа процесса диффузии хрома и оптимизации технологических режимов.

**Целью работы** является разработка физических основ создания структур для детекторов ионизирующих излучений с воспроизводимыми параметрами на основе слоев GaAs, выращенных методом газопазовой эпитаксии.

Для достижения поставленной цели, **решались следующие задачи:**

1. Исследование электрофизических свойств нелегированных эпитаксиальных слоев GaAs и детекторных структур на их основе.

2. Изучение закономерностей диффузионного легирования эпитаксиальных слоев примесью хрома.
3. Исследование характеристик слоев и детекторных структур, компенсированных хромом, в зависимости от исходной концентрации электронов и режима диффузии хрома.
4. Установление корреляции параметров детекторов со свойствами эпитаксиальных слоев.

**Объектами исследования** являлись многослойные структуры  $p^+-n-n^-$ ,  $p^+-n-n^-$  и  $p^+-n^-$  типа на основе эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs и  $\pi$ -GaAs. Нелегированные слои  $n$ -типа ( $n < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) были выращены методом газопазовой эпитаксии в системе Ga-AsCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>. Высокоомные  $\pi$ -слои были получены путем диффузии Cr в  $n$ -слои с концентрацией электронов  $n = (1 \div 6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Изготовление структур и проведение диффузии хрома осуществлялось в ОАО «НИИПП» (г. Томск).

#### **Научная новизна.**

1. Установлена корреляция электрофизических параметров эпитаксиальных слоев с различным уровнем легирования со свойствами детекторных структур на их основе.
2. Впервые определены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости хрома в эпитаксиальных слоях  $n$ -GaAs:S в диапазоне температур  $T_d = 750 \div 880^\circ\text{C}$ .
3. Впервые с помощью атомно-силовой микроскопии проведено исследование распределения напряженности электрического поля в детекторных структурах, полученных при различных режимах диффузии атомов хрома в эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs:S.
4. Установлено влияние высокоомной  $\pi$ -области на профиль электрического поля и механизм собирания неравновесного заряда из ионизационного трека, сформированного  $\gamma$ -квантом.

#### **Практическая значимость.**

1. Измерение частотной зависимости емкости  $p^+-n-n^-$ -детекторов на основе нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs является эффективным способом для отбора эпитаксиальных структур с высокими спектротрическими свойствами.
2. Установленные закономерности диффузии хрома в эпитаксиальные ГФЭ слои  $n$ -GaAs позволяют воспроизводимо создавать детекторы с однородным распределением электрофизических параметров и эффективности собирания заряда по площади структуры.
3. Применение эпитаксиальных слоев GaAs, компенсированных атомами хрома при оптимальных режимах диффузии, позволяет создавать фотovoltaические детекторы с высокой эффективностью собирания неравновесного заряда, созданного при поглощении  $\gamma$ -квантов с энергиями от 14 до 59,5 кэВ.



Практическая значимость работы подтверждается выполнением следующих научно-исследовательских программ, в рамках которых проводилась диссертационная работа: ФЦП «Кадры», ГК №02.740.11.0164 (2009 – 2011 г.), РФФИ 07-02-00314-а (2007-2009 г.), № 09-02-90724-моб\_ст. (2009 г.), программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», проводимая Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям и Федерального агентства по образованию (2007, 2008 гг.).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Существует корреляция между параметрами детекторов на основе нелегированных эпитаксиальных слоев и характером частотной зависимости емкости, обусловленной присутствием глубоких уровней. В качестве критерия пригодности эпитаксиальных структур для изготовления спектрометрических детекторов можно использовать величину их низкочастотной емкости.

2. Профили электрически активных атомов хрома при диффузии в эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs в интервале температур  $T_d = 750 \div 880$  °С описываются erfс-функцией. При этом температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости атомов хрома описываются

выражениями:  $D_0^{Cr} = D_0^{Cr} \exp\left(-\frac{Q_1}{kT}\right)$ ,  $N_s^{Cr} = N_0^{Cr} \exp\left(-\frac{Q_2}{kT}\right)$ , где

$$D_0^{Cr} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{с}, Q_1 = (4,1 \pm 0,2) \text{ эВ}, N_0^{Cr} = 2,3 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}, Q_2 = (1,9 \pm 0,4) \text{ эВ}.$$

3. Эпитаксиально-диффузионная технология позволяет управлять профилем напряженности электрического поля в детекторных структурах на основе слоев GaAs:Cr. Формирование дополнительного пика напряженности в активной области  $p^+-n-n^+$ -структур оказывает существенное влияние на эффективность собирания заряда от  $\gamma$ -квантов с энергией 59,5 кэВ.

**Достоверность** полученных результатов достигается использованием классических или уже опробованных в мировой научной практике экспериментальных методов и теоретических моделей, воспроизводимостью экспериментальных данных, удовлетворительным согласием результатов эксперимента с теоретическими расчетами.

**Личный вклад автора.** Диссертационная работа является результатом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками НОЦ «Физика и электроника сложных полупроводников» ОСП «СФТИ ТГУ», ОАО «НИИПП» и кафедры полупроводниковой электроники Национального исследовательского Томского государственного университета. Автором совместно с научным руководителем обсуждались цели работы, пути их достижения и полученные результаты. Личный вклад автора включает выбор методов решения задач, измерение характеристик экспериментальных образцов, проведение расчетов и анализ полученных данных. Расчет

профилей напряженности электрического поля проводился совместно с научным консультантом.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на 10-ой Российской научной студенческой конференции «Физика твердого тела» (г. Томск, 2006), на международных конференциях «SIBCON» (IEEE International Siberian conference on control and communication, Tomsk, 2005, 2007, 2009, Krasnoyarsk, 2011), на 9-й Международной конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (г. Томск, 2006), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск, 2008, 2010), на 9-й Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники'09» (г. Новосибирск-Томск, 2009).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах, из которых 4 – в журналах, включенных в список ВАК.

**Структура и объем работы.** Текст диссертации состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы; содержит 77 рисунков, 3 таблицы, библиографический список из 112 наименований – всего 130 страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и направление исследований, отмечены их новизна, научная и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту. Представлен краткий обзор структуры диссертации.

**Первая глава** носит обзорный характер. Приводится обзор литературных данных по исследованию детекторов на основе монокристаллического и эпитаксиального GaAs. Основное внимание уделено работам по использованию эпитаксиальных слоев GaAs, полученных методом газофазовой эпитаксии, для создания детекторов ионизирующих излучений. Анализ литературных данных показал, что эпитаксиальный GaAs обладает меньшей концентрацией основного антиструктурного дефекта –  $EL2$ -центра, что является важным условием для создания детекторов с высокой эффективностью сбора заряда.

Метод газофазовой эпитаксии (ГФЭ) позволяет выращивать нелегированные («чистые») слои  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $n \leq 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , в отличие от жидкофазовой эпитаксии (ЖФЭ). В результате, в барьерных детекторах на основе «чистых» ГФЭ-слоев активная область имеет большую толщину, чем в ЖФЭ-детекторах. В совокупности с высоким временем жизни электронов, «чистые» ГФЭ-слои являются наилучшими для создания спектрометрических детекторов на основе GaAs. Кроме того, детекторы на основе «чистых» слоев  $n$ -GaAs могут эффективно работать без приложения внешнего смещения. Такой режим работы невозможно реализовать в детекторах на основе объемного GaAs и ЖФЭ-слоев  $n$ -GaAs.

Отмечается, что в работах по исследованию детекторов на основе «чистых» ГФЭ-слоев  $n$ -GaAs слабо представлены исследования вольтамперных, вольт-фарадных характеристик и частотной зависимости емкости детекторов. Отсутствует четкая взаимосвязь электрофизических параметров слоев с электрическими характеристиками и амплитудными спектрами детекторов.

Кроме того, в детекторах барьерного типа на основе «чистых» ГФЭ-слоев  $n$ -GaAs актуальным является увеличение толщины активной области. Одним из способов решения этой проблемы является диффузия атомов хрома в слои  $n$ -GaAs и формирование высокоомных областей с проводимостью, близкой к собственной.

В выводах к главе сформулированы цель и задачи исследования, вытекающие из анализа литературных данных.

**Вторая глава** является методической. В ней описываются экспериментальные детекторные структуры и методики измерения их электрофизических параметров и характеристик.

В работе исследовались детекторные структуры на основе нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs и слоев компенсированных атомами Cr. Структуры были выращены методом газовой эпитаксии в системе Ga-AsCl<sub>3</sub>-H<sub>2</sub> на сильнолегированных теллуром или оловом  $n^+$ -подложках ( $n^+ = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) ориентации  $2^\circ$  (100). Структуры на основе нелегированных слоев были  $p^+-n-n^+$ -типа и состояли из легированного серой буферного слоя, нелегированного слоя  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $n = 1 \cdot 10^{12} \div 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и верхнего  $p^+$ -слоя, легированного цинком ( $p^+ = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Толщины слоев составляли 5, (30÷50) и 2 мкм, соответственно. Компенсация атомами хрома проводилась путем диффузии через  $p^+$ -слой в  $p^+-n-n^+$ -структуры на основе легированных серой слоев  $n$ -GaAs с концентрацией электронов  $n = (1 \div 6) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  и толщиной  $n$ -слоев  $d_n = 50 \div 70 \text{ мкм}$ . В результате варьирования температуры диффузии ( $T_d = 750 \div 880^\circ\text{C}$ ) и времени диффузии ( $t_d = 1 \div 16 \text{ ч.}$ ) были получены структуры с высокоомной  $\pi$ -областью различной толщины. В одних структурах толщина данной области ( $d_\pi$ ) была меньше толщины  $n$ -слоя ( $d_\pi < 30 \text{ мкм}$ ), и структуры имели строение  $p^+-\pi-n^+$ . Другие структуры были  $p^+-\pi-n^+$ -типа – в них высокоомная область занимала всю толщину  $n$ -слоя ( $d_\pi \approx d_n$ ).

Измерения вольт-фарадных (ВФХ), вольт-амперных (ВАХ) и амплитудных спектров (АС) детекторных структур проводилось с использованием стандартных блок-схем.

Исследование параметров диффузии (коэффициент диффузии, поверхностная концентрация) атомов хрома в эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs проводилось с использованием электролитического профилометра [1].

Изучение распределения напряженности электрического поля в детекторных структурах на основе  $\pi$ -слоев проводилось с применением атомно-силового микроскопа (АСМ) в режиме Кельвин-зонда [2] на поперечных

сколах структур. Для получения профиля электрического поля в структуре измерялось распределение контактной разности потенциалов (КРП) между зондом АСМ и подлежащей поверхностью поперечного скола структуры. Измерение профилей КРП проводилось для заземленных структур и структур с приложенным обратным напряжением  $U_{обр} = 0 \div 7$  В. Используя профиль КРП при смещении (КРП ( $U_{обр} \neq 0$  В)) и без него (КРП ( $U_{обр} = 0$  В)), рассчитывалось распределение падения напряжения ( $\Delta\phi(x)$ ) в объеме структур с помощью выражения [3]:

$$\Delta\phi(x)(U_{обр} \neq 0 \text{ В}) = \text{КРП}(U_{обр} \neq 0 \text{ В}) - \text{КРП}(U_{обр} = 0 \text{ В}). \quad (1)$$

Распределение напряженности электрического поля  $E(x)$  определялось путем дифференцирования профиля  $\Delta\phi(x)$  при фиксированном значении  $U_{обр}$  [4]:

$$E(x) = - \frac{\partial \Delta\phi(x)}{\partial x} \Big|_{U_{обр} = \text{const}}. \quad (2)$$

В третьей главе приводятся результаты исследований электрических и детекторных характеристик  $p^+-n^-n^+$ -структур на основе нелегированных или слабо легированных серой эпитаксиальных слоев арсенида галлия. Целью этих исследований было установление корреляции параметров слоев с характеристиками детекторных структур на их основе.

Экспериментальные структуры были разделены на несколько групп – в зависимости от уровня легирования эпитаксиального слоя и типа его проводимости. К первой группе относятся  $p^+-n^-n^+$ -структуры на основе слоев  $n$ -GaAs, слабо легированных серой в процессе роста. Типичная концентрация электронов в таких слоях составляла  $n = 1 \cdot 10^{14} \div 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а степень донорно-акцепторной компенсации ( $C_K = N_d/N_a$ ) была не более  $0,6 \div 0,7$ . Другую группу составляют  $p^+-n^-n^+$ -структуры на основе нелегированных слоев  $n$ -типа с концентрацией  $n^- < 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и  $C_K \geq 0,8$ . В последнюю группу входят  $p^+-p^-n^+$ -структуры на основе нелегированных слоев  $p$ -типа проводимости с концентрацией дырок  $p = 1 \cdot 10^{10} \div 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Из анализа ВФХ был установлен различный характер распределения концентрации носителей заряда по толщине  $n$ -слоя. В эпитаксиальных  $p^+-n^-n^+$ -структурах концентрация электронов распределялась равномерно по толщине  $n$ -слоя и для разных структур изменялась в диапазоне  $n = 1,3 \cdot 10^{14} \div 1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (рис. 1, кр.1). В  $p^+-n^-n^+$ -структурах распределение концентрации электронов в  $n$ -слое было неравномерным и обычно характеризовалось возрастанием концентрации от  $p^+$ -слоя вглубь эпитаксиального слоя (рис. 1, кр.2). Этот эффект может быть связан с неконтролируемым изменением концентрации остаточных донорных и акцепторных примесей и увеличением степени компенсации в процессе эпитаксиального роста  $n$ -слоя, а также с диффузией цинка из  $p^+$ -слоя.



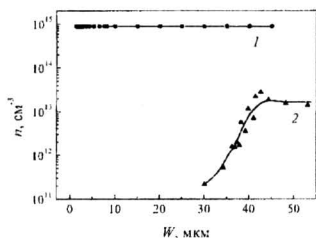


Рис. 1 – Профили концентрации электронов в эпитаксиальных слоях структур различных типов: 1 –  $p^+n-n^+$ , 2 –  $p^+p^-n^+$

температуры в интервале  $T = -15 \div +60$  °С. Кроме того, исследования температурной зависимости обратного тока на участке ВАХ, обусловленном эффектом Пула-Френкеля, позволили оценить энергию ионизации глубоких донорных уровней, участвующих в процессе генерации носителей заряда. Было получено значение  $\Delta E_d^F = (0,84 \pm 0,04)$  эВ, что близко к энергии ионизации глубокого донора –  $EL2$ -центра.

При исследовании структур на основе «чистых» слоев с низкой концентрацией носителей заряда, как правило, наблюдалась большая дисперсия значений емкости диодов, изготовленных из разных частей эпитаксиальной структуры. Особенно это касается емкости, измеренной на низких частотах. На рис. 2 представлены частотные зависимости емкости детекторов на основе  $p^+n^-n^+$ -структуры из различных частей пластины. Значительный разброс значений емкости  $C$  на низких частотах ( $f_{изм} = 10^2$  Гц) является следствием неоднородного распределения примеси вдоль пластины. При сопоставлении параметров структур, изготовленных на разных пластинах из единого эпитаксиального процесса, этот разброс иногда оказывается еще существеннее. Это свидетельствует о плохой воспроизводимости процесса получения слоев с предельно низкой концентрацией носителей заряда.

Исследования чувствительности к  $\alpha$ -частицам показали, что детекторные  $p^+n^-n^+$ -структуры обладали спектрометрическими свойствами лишь при концентрации электронов в  $n$ -слое не выше  $n = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Структуры  $p^+n^-n^+$ -типа обладали такими же спектрометрическими свойствами, но максимальное значение эффективности

Снижение концентрации носителей заряда в  $n$ -слоях приводило к появлению сильной частотной зависимости емкости детекторных структур на их основе. Частотная зависимость емкости обусловлена перезарядкой глубоких центров (в частности  $EL2$ -центров), присутствующих в эпитаксиальных слоях. Этот факт нашел подтверждение в сдвиге частотной зависимости емкости структур в область высоких частот при увеличении рабочей тем-

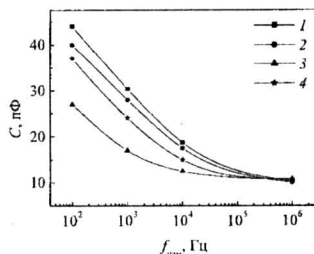


Рис. 2 – Частотная зависимость емкости детекторов на основе  $p^+n^-n^+$ -структуры из различных частей пластины. Площадь детекторов 4 мм<sup>2</sup>

собираения заряда  $\eta_a = 100\%$  достигалась при меньших обратных напряжениях  $U_{обр}$ . Различная скорость возрастания эффективности сбора заряда с ростом напряжения  $U_{обр}$  связана с различным соотношением длин пробега  $\alpha$ -частиц и ширины ОПЗ  $p^+-n$ -перехода структур.

При регистрации  $\gamma$ -квантов детекторные структуры на основе легированных серой  $n$ -слоев не обладали спектрометрическими свойствами – за счет малой толщины активной области и высокого уровня шумов (большая емкость). Структуры на основе нелегированных  $n^-$ -слоев могли работать без смещения ( $U_{обр} = 0$  В) и имели хорошее энергетическое разрешение и эффективность сбора заряда, близкую к 100 %, при относительно небольшом напряжении смещения ( $U_{обр} = 15\div 20$  В).

Следует отметить влияние однородности и воспроизводимости получения эпитаксиальных слоев с предельно низкой концентрацией электронов на амплитудные спектры детекторных структур на их основе. Однородность контролировалась по соотношению емкостей  $C_{ИЧ}$  и  $C_{ВЧ}$ , измеренных на частотах тестового сигнала  $f_{тзм} = 10^2$  Гц и  $10^6$  Гц, соответственно. На рис. 3 приведены амплитудные спектры (АС) от  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 59,5$  кэВ детекторных  $p^+-n^-n^+$ -структур с различным соотношением  $C_{ИЧ}/C_{ВЧ}$ , полученных из разных частей одной эпитаксиальной пластины. Видно, что при уменьшении емкости  $C_{ИЧ}$  (и фиксированной емкости  $C_{ВЧ}$ ) наблюдается сдвиг АС в сторону больших номеров канала АЦП (увеличение эффективности сбора заряда) и пик событий проявляется более четко (улучшение энергетического разрешения). Аналогичная корреляция отношения  $C_{ИЧ}/C_{ВЧ}$  и амплитудных  $\gamma$ -спектров четко проявлялась для детекторов из разных пластин, полученных в одном процессе эпитаксиального роста.

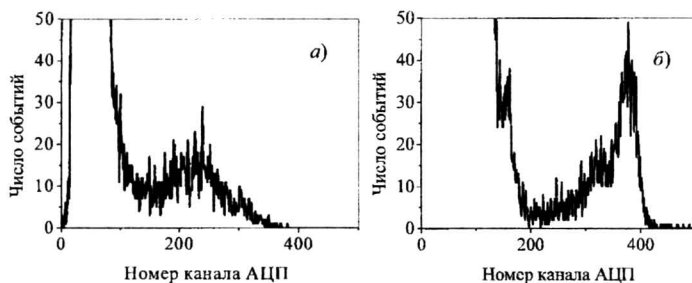


Рис. 3 – Изменение амплитудных спектров от  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 59,5$  кэВ в зависимости от соотношения емкостей  $C_{ИЧ}/C_{ВЧ}$  детекторных  $p^+-n^-n^+$ -структур: а – 44/10, б – 27/10

В случае формирования нелегированных слоев  $p$ -типа проводимости структуры на основе этих слоев вообще не обладали спектрометрическими свойствами при регистрации ионизирующего излучения. Этот факт

обусловлен высокой концентрацией глубоких центров, о чем свидетельствует очень сильная частотная зависимость емкости ( $C_{\text{нч}}/C_{\text{вч}} \approx 20 \div 30$ ).

**В четвертой главе** представлены результаты исследования параметров диффузии атомов хрома в проточной системе (в потоке  $\text{H}_2$ ) в эпитаксиальные ГФЭ-слои  $n\text{-GaAs:S}$  с концентрацией электронов  $n = (1,1 \div 6,0) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Кроме того, изучалось влияние режимов диффузии атомов хрома на электрофизические свойства детекторных структур на основе высокоомных слоев  $\pi\text{-GaAs:S,Cr}$ , полученных в результате диффузии.

В результате проведенных исследований, впервые были получены температурные зависимости коэффициента диффузии  $D^{\text{Cr}}$  и растворимости электрически активных атомов хрома  $N_s^{\text{Cr}}$  в эпитаксиальном  $n\text{-GaAs}$  в интервале температур диффузии  $T_d = 750 \div 880^\circ\text{C}$ . Полученные зависимости описываются выражениями:

$$D^{\text{Cr}} = D_0^{\text{Cr}} \exp\left(-\frac{Q_1}{kT}\right), \quad N_s^{\text{Cr}} = N_0^{\text{Cr}} \exp\left(-\frac{Q_2}{kT}\right),$$

где  $D_0^{\text{Cr}} = 1,9 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $Q_1 = (4,1 \pm 0,2) \text{ эВ}$ ,  $N_0^{\text{Cr}} = 2,3 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$ ,  $Q_2 = (1,9 \pm 0,4) \text{ эВ}$ .

Было установлено, что варьирование режимов диффузии атомов хрома (температура, время) позволяет получать детекторные структуры различных типов. При этом в эпитаксиальном слое может формироваться либо область с пониженной, относительно исходной, концентрацией электронов  $n^-$ , либо высокоомная область  $\pi$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Так, при низких температурах диффузии  $T_d \leq 800^\circ\text{C}$  формируются структуры  $p^+n^-n^-n^+$ -типа, при средних температурах  $T_d = 820 \div 840^\circ\text{C}$  – структуры  $p^+\pi n^-n^+$ -типа, а при более высоких температурах  $T_d > 840^\circ\text{C}$  (либо больших временах диффузии  $t_d = 9 \div 10 \text{ ч}$ ) –  $p^+\pi n^+$ -структуры.

Температурные и временные границы перехода от одного типа структуры к другому зависят от параметров исходной структуры: толщины, концентрации электронов в  $n$ -слое и вида профиля  $n(x)$ . Увеличение толщины  $n$ -слоя и концентрации электронов в нем сдвигают эти границы в область более высоких температур и времён диффузии.

**В пятой главе** представлены результаты исследования влияния режимов диффузии хрома на электрофизические характеристики и амплитудные спектры детекторов на основе эпитаксиальных слоев  $n\text{-GaAs:S}$ , компенсированных атомами хрома. Кроме того, проведены исследования распределения напряженности электрического поля по толщине структур при различных режимах диффузии и его влияния на амплитудные  $\alpha$ - и  $\gamma$ -спектры детекторов на основе высокоомных слоев  $\pi\text{-GaAs:S,Cr}$ .

Исследование ВФХ показали, что при переходе от  $p^+-n^-n^-n^+$ -структур к  $p^+-\pi-n^-n^+$ - и  $p^+-\pi-n^+$ - структурам емкость  $C$  детекторов на их основе уменьшается и перестает зависеть от обратного напряжения. Это объясняется формированием высокоомной  $\pi$ -области и увеличением ее толщины при повышении температуры диффузии хрома. Наличие зависимости ёмкости от обратного напряжения в  $p^+-n^-n^-n^+$ -структурах позволило оценить из ВФХ концентрацию носителей заряда в  $n^-$ -области рабочего эпитаксиального слоя. На рис. 4 представлено типичное распределение концентрации электронов по толщине эпитаксиального  $n^-$ -слоя  $p^+-n^-n^-n^+$ -структуры. При выбранном режиме диффузии хрома область эпитаксиального слоя глубиной до 10 мкм имеет концентрацию  $n \leq 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , далее следует возрастание до  $10^{14} \text{ см}^{-3}$ . В структурах других типов не удалось оценить концентрацию носителей заряда из ВФХ, поскольку обедненный слой занимает большую часть эпитаксиального слоя, и емкость мало меняется с напряжением.

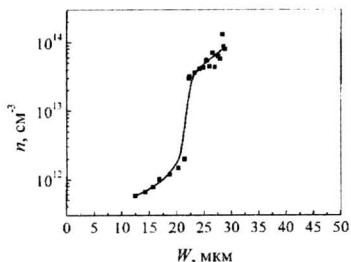


Рис. 4 – Распределение концентрации носителей заряда в  $n^-$ -слое  $p^+-n^-n^-n^+$ -структуры. Режим диффузии:  $T_d = 800^\circ\text{C}$ ,  $t_d = 4,5 \text{ ч}$

Как показали исследования, вид ВАХ не зависит от типа структуры (т.е. режима диффузии). При обратных напряжениях  $U_{\text{обр}} \geq 5 \text{ В}$  вероятным механизмом протекания обратного тока может быть генерация носителей заряда, облегченная электрическим полем (эффект Пула-Френкеля). В  $p^+-n^-n^-n^+$ -структурах генерация носителей заряда происходит в ОПЗ  $p^+-n^-$ -перехода, а в  $p^+-\pi-n^-n^+$ - и  $p^+-\pi-n^+$ - структурах – в высокоомной  $\pi$ -области или ОПЗ  $p^+-\pi$ - и  $\pi-n^-$ -переходов.

Важной характеристикой, влияющей на работу полупроводниковых детекторов, является распределение напряженности электрического поля в активной области детекторов. На рис. 5 представлены профили напряженности электрического поля  $E(x)$  по толщине структур различных типов. Из 5, а видно, что в  $p^+-n^-n^-n^+$ -структурах имеется один максимум напряженности электрического поля на границе с  $p^+$ -областью. В  $p^+-\pi-n^-n^+$ -структурах, имеется дополнительный максимум –  $E_2$ , расположенный на определенном расстоянии от  $p^+$ -области. В  $p^+-n^-n^-n^+$ -структурах положение максимума напряженности электрического поля  $E_1$  совпадает с положением  $p^+-n^-$ -перехода, а в  $p^+-\pi-n^-n^+$ -структурах первый максимум совпадает с  $p^+-\pi$ -переходом. Второй максимум напряженности электрического поля  $E_2$  в  $p^+-\pi-n^-n^+$ -структурах располагается в области точки пересечения  $x_i$  профиля хрома с профилем исходной концентрации электронов в эпитаксиальном  $n^-$ -слое. В данном случае точка  $x_i$  находится

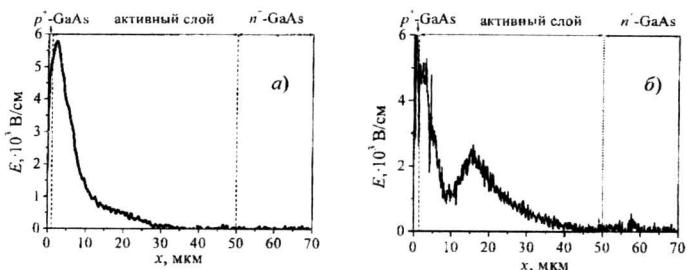


Рис. 5 – Распределение напряженности электрического поля в структурах  $p^+-n^-n^-n^-$  (а) и  $p^+-\pi-n^-n^-$  (б) типов при  $U_{обр} = 6$  В.

в глубине эпитаксиального слоя (рис. 5, б). В  $p^+-\pi-n^-$ -структурах глубина диффузии атомов хрома превышает толщину эпитаксиального слоя. В этом случае максимум напряженности электрического поля  $E_2$  располагается на границе эпитаксиального слоя и  $n^+$ -подложки.

На рис. 6 представлены амплитудные  $\alpha$ -спектры структур различных типов. Структуры  $p^+-n^-n^-n^-$  и  $p^+-\pi-n^-n^-$ -типов имели одинаковый вид АС (рис. 6, а), на которых четко выделялись три пика событий, соответствующие энергиям использованных  $\alpha$ -частиц (5,153; 5,483 и 5,801 МэВ). При переходе к  $p^+-\pi-n^-$ -структурам на АС наблюдался только один пик событий (рис. 6, б). Эффективность собирания заряда  $\eta_a$  уменьшалась от 100 % до 55 % при переходе от  $p^+-n^-n^-n^-$  к  $p^+-\pi-n^-$ -структурам.

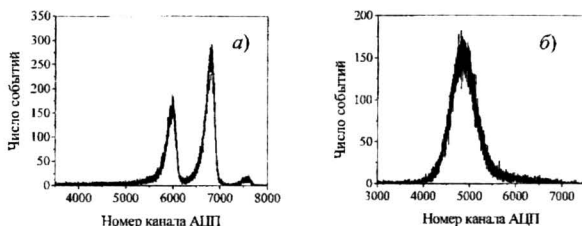


Рис. 6 – Амплитудные спектры от  $\alpha$ -частиц при  $U_{обр} = 50$  В структур различных типов: а –  $p^+-n^-n^-n^-$ ,  $p^+-\pi-n^-n^-$ , б –  $p^+-\pi-n^-$

На рис. 7 приведены амплитудные  $\gamma$ -спектры от радиоактивного источника  $^{241}\text{Am}$  для исследованных типов структур при  $U_{обр} = 21$  В. Видно, что на всех  $\gamma$ -спектрах присутствует пик, соответствующий регистрации квантов с энергиями 15÷17 кэВ (номер канала АЦП равен 70). Причем в  $p^+-n^-n^-n^-$  и  $p^+-\pi-n^-n^-$ -структурах (рис. 7, а, б) при номерах канала АЦП 250÷350 имеется пик событий, соответствующий квантам с энергией 59,5 кэВ. В  $p^+-\pi-n^-$ -структурах пик событий располагается при меньших номерах канала АЦП, чем в  $p^+-n^-n^-n^-$ -структурах.

На АС  $p^+-n^-n^+$ -структур пик от квантов с  $E_\gamma = 59,5$  кэВ полностью отсутствует и вместо него присутствует «полочка» событий в диапазоне номеров канала АЦП от 200 до 400 (рис. 7, в). Стоит отметить, что в  $p^+-n^-n^-n^+$ - и  $p^+-\pi-n^-n^+$ - структурах наблюдается чёткая корреляция между толщиной высокоомной  $\pi$ -области  $d_{\text{выс}}$  и номером канала АЦП, соответствующим пику событий от квантов с энергией  $E_\gamma = 59,5$  кэВ. С увеличением  $d_{\text{выс}}$  пик смещается в сторону меньших значений номера канала и при  $d_{\text{выс}} \approx d_n$  (в  $p^+-\pi-n^+$ -структурах) полностью исчезает.

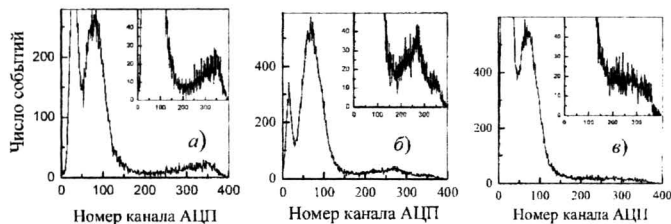


Рис. 7 – Амплитудные  $\gamma$ -спектры при  $U_{\text{обр}} = 21$  В структур различных типов: а –  $p^+-n^-n^-n^+$ , б –  $p^+-\pi-n^-n^+$ , в –  $p^+-\pi-n^+$ . На вставках приведены пики событий от  $\gamma$ -квантов с энергией 59,5 кэВ в увеличенном масштабе

Изменения АС при переходе от одного типа детекторных структур к другим связаны с влиянием распределения напряженности электрического поля в активной области структур на процесс разделения и сбора неравновесного заряда. В случае поглощения  $\alpha$ -частиц изменяется соотношение длины их пробега и толщины области сильного электрического поля в активной области структур. Присутствие пиков событий на АС от  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma = 15 \div 17$  кэВ говорит о сборе как электронной, так и дырочной компонент неравновесного заряда в результате поглощения более 60% потока квантов на глубине эпитаксиального слоя, равной 30 мкм от  $p^+$ -области. В данной области эпитаксиального слоя у всех типов структур присутствует пик электрического поля с максимальным значением напряженности. Наличие «полочки» событий на АС структур  $p^+-\pi-n^+$ -типа свидетельствует о сборе только неравновесных электронов. Этот факт был подтвержден модельным расчетом АС от  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 59,5$  кэВ с учетом установленного неравномерного распределения напряженности электрического поля в активной области экспериментальных структур. На рис. 8 представлены расчетные амплитудные  $\gamma$ -спектры. Для согласования расчетных АС с экспериментальными варьировалось время жизни дырок  $\tau_p$ . В результате, время жизни дырок для структур I и II типов составило  $\tau_p = 1 \cdot 10^{-10}$  с, а для структур III типа –  $\tau_p = 1 \cdot 10^{-12}$  с. Малое время жизни дырок  $\tau_p = 1 \cdot 10^{-12}$  с в структурах III типа указывает на отсутствие сбора дырок, например, за счет

их захвата на глубокие акцепторные уровни Cr (концентрация которых в  $p^+-n-n^+$ -структурах является большей, чем в структурах других типов).

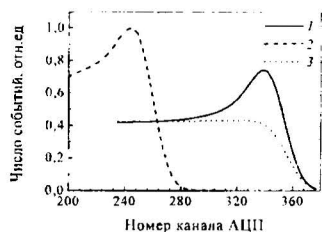


Рис. 8 – Расчетные амплитудные спектры от  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 59,5$  кэВ для структур различных типов: 1 –  $p^+-n-n^+$ , 2 –  $p^+-n-n^-$ , 3 –  $p^- - n^-$ .

Необходимо отметить, что структуры, в которые была проведена диффузия хрома, обладают значительно более высокой однородностью электрофизических параметров вдоль пластины, чем структуры на основе нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs. Распределение емкости диодов по площади пластины является достаточно однородным (разброс значений не превышает  $\pm 10\%$ ). Как следствие, в компенсированных структурах наблюдалась высокая однородность эффективности собирания заряда  $\eta$  от  $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -квантов вдоль пластин.

При этом разброс значений  $\eta$  вдоль продольного сечения структур не превышал 5 %, а в поперечном – практически не наблюдался.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведенных исследований:

1. Показано, что снижение концентрации электронов в детекторных структурах на основе нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs приводит к существенному улучшению их спектрометрических свойств и повышению эффективности собирания заряда. Однако, при этом ухудшаются однородность и воспроизводимость параметров детекторных структур.
2. Установлено, что причиной низкой воспроизводимости параметров детекторных структур на основе нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs ( $n < 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ) является неконтролируемое изменение концентрации глубоких уровней, что проявляется в характере частотной зависимости емкости структур. Наилучшими параметрами обладают структуры с минимальным значением низкочастотной емкости.
3. Впервые получены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости электрически активных атомов хрома в эпитаксиальных слоях  $n$ -GaAs при диффузии в потоке  $\text{H}_2$  в интервале температур  $750 \div 880^\circ \text{C}$ .
4. Установлено, что изменение режимов диффузии (температура, время) атомов хрома позволяет получать детекторные структуры различных типов. При этом в эпитаксиальном слое структур может формироваться либо  $n^-$ -область с пониженной относительно исходной концентрацией электронов, либо высокоомная область  $\pi$ -типа с удельным сопротивлением  $\rho = 1 \cdot 10^7 \div 5 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

5. Впервые проведено исследование распределения напряженности электрического поля в детекторных структурах на основе эпитаксиальных слоев GaAs, компенсированных атомами хрома при различных режимах диффузии. Установлено, что в  $p^+-n^--n^+-n^+$ -структурах поле спадает монотонно в  $n$ -области  $p^+-n^+$ -перехода. При формировании высокоомной  $\pi$ -области в  $p^+-\pi-n^+-n^+$ -структурах электрическое поле имеет конфигурацию с двумя пиками напряженности: в области  $p^+-\pi$ -перехода и в области  $\pi-n^+$ -перехода.
6. Изучено влияние толщины  $\pi$ -области на амплитудные спектры детекторных структур на их основе. Установлено, что при увеличении толщины  $\pi$ -области эффективность собирания заряда от  $\gamma$ -квантов с  $E_\gamma = 59,5$  кэВ уменьшается. При толщине  $\pi$ -области равной толщине эпитаксиального слоя отсутствует собирание неравновесных дырок в результате захвата их на глубокие уровни хрома.
7. Установлено, что технология введения атомов хрома в эпитаксиальные слои  $n$ -GaAs методом диффузии позволяет получать детекторные структуры, способные работать в фотовольтаическом режиме и с более высокой однородностью электрофизических характеристик, чем при использовании нелегированных эпитаксиальных слоев  $n$ -GaAs, получаемых методами ГФЭ и ЖФЭ.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Айзенштат, Г. И. Детекторы рентгеновского излучения на эпитаксиальном арсениде галлия / Г. И. Айзенштат, М. Д. Вилисова, Е. П. Другова, М. А. Лелеков, Д. Ю. Мокеев, **И. В. Пономарев**, Л. П. Пороховниченко, О. П. Толбанов, В. А. Чубирко // Журнал технической физики – 2006. – Т.76. №8. – С. 46–49.
2. Вилисова, М. Д. Диффузия хрома в эпитаксиальный арсенид галлия / М. Д. Вилисова, Е. П. Другова, **И. В. Пономарев**, В. А. Чубирко // Физика и техника полупроводников – 2008. – Т.42, №2. – С. 239–242.
3. Гермогенов, В. П. Расчет профилей напряженности электрического поля в эпитаксиально-диффузионных структурах на основе GaAs:Cr / В. П. Гермогенов, **И. В. Пономарев** // Изв. вузов. Физика. – 2008. – №9. – С. 102–106.
4. Вилисова, М. Д. Электрические характеристики детекторных структур на основе эпитаксиального арсенида галлия / М. Д. Вилисова, В. П. Гермогенов, **И. В. Пономарев** // Изв. вузов. Физика. – 2008. – №9/3. – С. 21–22.
5. Вилисова, М. Д. Детекторы альфа-частиц на основе эпитаксиального GaAs, выращенного из газовой фазы / М. Д. Вилисова, В. П. Гермогенов, **И. В. Пономарев**, О. П. Толбанов // Изв. вузов. Физика. – 2010. – №9/2. – С. 335–336.



6. Вилисова, М. Д. Исследование распределения электрического поля в детекторных структурах на GaAs методом Кельвин-зонд-микроскопии / М. Д. Вилисова, В. П. Гермогенов, О. Ж. Казтаев, В. А. Новиков, **И. В. Пономарев**, А. Н. Титков // Письма в журнал технической физики – 2010 – Т.36, №. 9. – С. 95–101.
7. Vilisova, M. D. Detector structures based on epitaxial gallium arsenide compensated by chromium / M. D. Vilisova, O. P. Tolbanov, D. Y. Mokeev, E. P. Drugova, V. A. Chubirko, L. P. Porokhovnichenko, **I. V. Ponomarev** // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2005). – Tomsk, 2005. – P.107–110.
8. Вилисова, М. Д. Фотовольтаические детекторы ионизирующих излучений на основе эпитаксиального GaAs, компенсированного хромом / М. Д. Вилисова, В. П. Гермогенов, Е. П. Другова, Д. Ю. Мокеев, **И. В. Пономарев**, Л. П. Пороховниченко, О. П. Толбанов, В. А. Чубирко // Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III–V»: Материалы международной конференции. – Томск: Томский госуниверситет, 2006. – С. 485–488.
9. **Пonomarev, И. В.** Параметры детекторов из эпитаксиального GaAs, компенсированного хромом // Физика твердого тела: Сборник материалов X Российской научной студенческой конференции. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2006. – С. 239–242.
10. Kalygina, V. M. Current-voltage characteristics of detector structures based on epitaxial gallium arsenide / V. M. Kalygina, **I. V. Ponomarev**, E. S. Slunko // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Tomsk, 2007. Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2007. – P. 207–210.
11. Kaztaev, O. G. Measurements of electric potential in GaAs detectors using Kelvin probe force microscopy / O. G. Kaztaev, V. A. Novikov, **I. V. Ponomarev** // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). Proceedings. – Tomsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, March 27-28, 2009. – P.166-169.
12. Вилисова, М. Д. Исследование распределения электрического поля в детекторных структурах на GaAs с помощью СЗМ / М. Д. Вилисова, В. П. Гермогенов, О. Ж. Казтаев, В. А. Новиков, **И. В. Пономарев** // Тезисы докладов IX Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2009» Новосибирск-Томск, 28 сентября – 3 октября 2009 г. – Новосибирск, 2009. – С. 329.
13. Vilisova, M. D. Detector of  $\gamma$ -quantum based on Epitaxial GaAs:S,Cr layers / M. D. Vilisova, V. P. Germogenov, **I. V. Ponomarev**, A. V. Tyazhev // 2011 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. Russia, Krasnoyarsk, September 15–16, 2011. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011. – P. 249–251.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Асанов, О. М. Установка измерения профиля концентрации носителей в полупроводниках / О. М. Асанов, А. В. Градобоев, Н. Д. Гранкина и др. // Электронная промышленность. – 1981. – Т. 3. – С. 41–42.
2. Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов – М.: Техносфера, 2004. – 144 с.
3. Katzer, K.I.-D. Voltage drop in an  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  light-emitting diode probed by Kelvin probe force microscopy / K.I.-D. Katzer, W. Mertin, G. Bacher. // Appl.Phys.Lett. 2006. – Vol. 89. – P. 103522–103522-3.
4. Robin, F. Investigation of the cleaved surface of a  $p-i-n$  laser using Kelvin probe force microscopy and two-dimensional physical simulations / F. Robin, H. Jacobs, O. Homan et al. // Appl.Phys.Lett. – 2000. – Vol. 76, № 20. – P. 2907–2909.



Подписано в печать: 28.10.2011 г.

Бумага: офсетная

Тираж: 100 экз.

Печать: трафаретная

Формат: 60×84/16

Усл. печ. л.: 1,16

Заказ: 609/Н

---

Издательство

Томского государственного педагогического университета

г. Томск, ул. Герцена, 49. Тел.: (382-2) 52-12-93

e-mail: [tipograf@tspu.edu.ru](mailto:tipograf@tspu.edu.ru)

